

Roope Jetsu

Ydinvoiman korvaami- sen kustannukset ja ympäristövaikutukset Suomessa

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Syyskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Roope Jetsu: Ydinvoiman korvaamisen kustannukset ja ympäristövaikutukset Suomessa

Costs and environmental effects of replacing nuclear power in Finland

Tampereen yliopisto

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta

Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö

Syyskuu 2020

Ydinvoima kattoi 32 % Suomen sähköntuotannosta vuonna 2018, ja tulevaisuudessa sen osuus tulee nousemaan Olkiluoto 3 -ydinvoimalan valmistuessa. Samaan aikaan monet maat, kuten Saksa, ovat luopumassa ydinvoimasta kokonaan ja korvaamassa sen pääosin uusiutuvilla energiamuodoilla. Työn tarkoituksena oli selvittää Suomen ydinvoiman korvaamisen mahdollisia vaihtoehtoja, kustannuksia ja vaikutuksia maan CO₂ päästöihin. Lisäksi työssä selvitettiin, mitkä olisivat kustannukset ja sähköntuotannon CO₂ päästöt, mikäli Suomessa tuotettaisiin sähköä mahdollisimman paljon ydinvoimalla sekä uusiutuvilla energiamuodoilla.

Työ jakautui kahteen osaan. Kirjallisuustutkimusosassa käsiteltiin Suomen sähköntuotantoa yleisellä tasolla, Saksassa tapahtuneita muutoksia sähköntuotannossa sen jälkeen, kun maa päätti luopua ydinenergian käytöstä sekä uusiutuvien käyttöä rajoittavia tekijöitä Suomessa. Työssä havaittiin, ettei Suomella ole mahdollisuutta siirtyä kokonaan uusiutuvia energianmuotoja käyttävään sähköntuotantoon, ja että ydinvoimasta luopuminen tulisi nostamaan sähköntuotannon CO₂ päästöjä ainakin hetkellisesti.

Laskentaosiossa tutkittiin ydinvoiman poistamisesta aiheutuvia kustannuksia sekä CO₂ päästö-
määrien lisäyksiä kahdessa eri skenaariossa. Skenaariot olivat ydinvoiman korvaaminen kokonaan uusiutuvilla energianmuodoilla sekä taloudellisesti mahdollisimman edullinen korvaaminen. Tämän lisäksi selvitettiin kustannuksien ja CO₂ päästöjen muutos mahdollisimman päästöttömälle yhteiskunnalle. Laskenta suoritettiin Microsoft Excel -ohjelmalla, ja laskennassa käytetyt arvot saatiin energialähdekohtaisista taulukoista ja aiemmista tutkimuksista.

Tuloksiksi saatiin, että pelkästään uusiutuvilla ydinvoiman korvaaminen lisäisi Suomen sähköntuotannon kokonaiskustannuksia 1,1 miljardia euroa vuodessa, ja lisäisi maan CO₂ päästöjä 1,08 miljardia kilogrammaa vuotta kohden. Taloudellisesti edullisin vaihtoehto, eli tuulivoimalla ja maakaasulla korvaaminen, lisäisi kustannuksia kokonaisuudessaan 870 miljoonaa euroa vuodessa, mutta kasvattaisi CO₂ päästöjä 2,16 miljardia kilogrammaa. Maksimaalinen ydinvoiman ja uusiutuvien käyttö puolestaan lisäisi Suomen sähköntuotannon kustannuksia 1,2 miljardia vuodessa, mutta vähentäisi sähköntuotannon hiilidioksidipäästöjä 39 %.

Tulokset osoittavat, ettei Suomen irtaantuminen ydinvoimasta tapahtuisi ilman suuria taloudellisia investointeja tai hiilidioksidipäästöjen kasvamista. Uusiutuvilla energiamuodoilla ei voida nykyisillä tekniikoilla tuottaa Suomen tarvitsemaa sähkönmäärää kokonaan, joten jos Suomessa halutaan päästä sähköntuotannossa mahdollisimman vähäisiin päästöihin, ydinvoiman käyttöä tulee jatkaa edelleen tulevaisuudessa.

Avainsanat: ydinvoima, uusiutuva sähköntuotanto, Suomen sähköntuotanto, sähkön hiilidioksidipäästöt

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
2.	Sähköntuotanto Suomessa.....	3
2.1	Sähkönkokonaistuotto ja sähköntuotantomenetelmät.....	3
2.2	Ydinvoima Suomessa.....	4
2.3	Ydinvoiman hyödyt ja haitat.....	5
2.4	Ydinvoiman taloudellinen puoli	6
3.	Saksan ydinvoimasta luopuminen	8
3.1	Saksan historia ydinvoimassa	8
3.2	Saksan sähkönhinnan muutos.....	8
3.3	Korvaava energiantuotanto.....	9
3.4	Vaikutus kasvihuonepäästöihin	10
4.	Uusiutuvien energianlähteiden rajoitukset	13
4.1	Vaihteleva saatavuus ja varastointitekniikat.....	13
4.2	Suomen varastointipotentiaali.....	13
4.3	Maksimaalinen uusiutuvien määrä.....	14
5.	Ydinvoiman korvaaminen Suomessa.....	15
5.1	Suomen tämän hetken energiatavoitteet	15
5.2	Sähköntuotannon hinnan muutokset	15
5.3	Maksimaalinen uusiutuvilla korvaaminen.....	16
5.4	Taloudellisesti halvin vaihtoehto	18
5.5	Ydinvoiman ja uusiutuvien maksimaalinen käyttö	20
6.	Johtopäätökset.....	23
	LÄHTEET	25

1. JOHDANTO

Ydinvoimaa on käytetty maailmalla sähkön tuottamiseen jo vuodesta 1954, jolloin ensimmäinen sähköä markkinoille tuottava ydinreaktori käynnistettiin Neuvostoliitossa [1]. Nykyään ydinvoima on maailman neljänneksi suurin sähköntuotantomuoto, vuonna 2017 sillä tuotettiin globaalisti 10,2 % maailman sähköntuotannosta, mikä vastaa 2623 TWh [2]. Suomen tämän hetken energiantuotantopolitiikkana on ollut lisätä ydinvoiman käyttöä sähköntuotannossa 2030 luvulle asti, samaan aikaan kun monet maat kuten esimerkiksi Saksa pyrkii pääsemään ydinvoimasta kokonaan eroon [3][4].

Ydinenergiaan liittyy tänä päivänä todella paljon keskustelua sen tarpeellisuudesta, riskeistä ja kustannuksista. Ydinvoimaan liittyy aina muita energiantuotantomuotoja suurempi onnettomuusalttius ja sen käytöstä on pitkäaikaisia seurauksia syntyvien ydinjätteen takia. Ydinenergia on kuitenkin vain vähän hiilidioksidipäästöjä tuottavaa energiaa, minkä vuoksi sen käyttö vähentää kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä, ja näin ollen hidastaa ilmaston lämpenemistä.

Ydinvoiman osuus maailman sähköntuotannosta on pienentynyt vuoden 1993 huipusta, jolloin ydinvoimalla tuotettiin 17 % maailman sähköstä [5]. Samanaikaisesti Suomen halu lisätä ydinvoiman käyttöä on aiheuttanut paljon vastustusta eri puolueiden ja järjestöjen taholta, jotka uskovat, että Suomen tulisi panostaa kaikki uuteen sähköenergian tuotantoon käytettävät resurssinsa uusiutuviin energiantuotantomuotoihin, kuten Saksassa on voimakkaasti yritetty tehdä. Tässä työssä on tarkoitus tutkia, minkälaisia vaikutuksia ydinvoiman nopealla alasajolla olisi Suomen sähköntuotantoon, sähkön hintoihin ja kasvihuonekaasupäästöihin sähköntuotannon näkökulmasta.

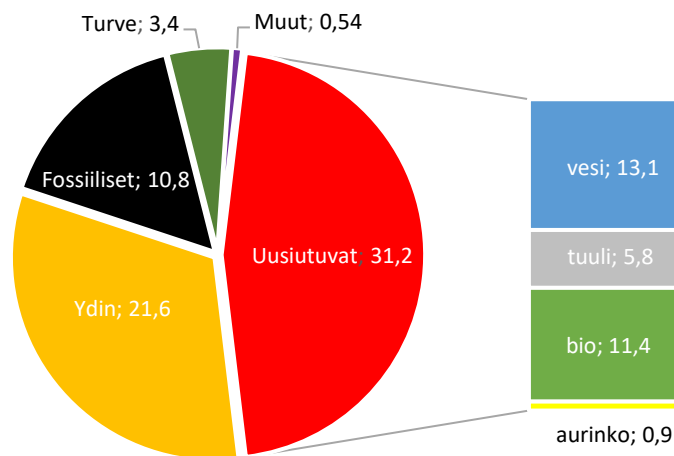
Työssä selvitetään ensin Suomen tämänhetkistä sähköntuotantojärjestelmää ja ydinvoiman asemaa nyky-yhteiskunnassamme. Kolmannessa luvussa selvitetään ydinvoimasta luopumisen vaikutuksia Saksan sähkömarkkinoihin ja päästöihin, koska Saksa on samankaltaisen sähköntuotantorakenteen ansiosta hyvä vertailukohta Suomelle. Neljännessä luvussa käydään läpi tekijöitä, jotka jarruttavat Suomen siirtymistä kokonaan uusiutuvilla tuotettuun sähkön tuotantoon. Viidennessä luvussa selvitetään, mitä erilaisia vaihtoehtoisia ratkaisuja Suomella on ydinvoimasta luopumiseen. Luvussa lasketaan näiden eri skenaarioiden aiheuttamat kustannukset sekä hiilidioksidipäästöjen muutokset Suomen sähköntuotannossa. Lisäksi luvussa tutkitaan mallia, jossa ydinvoimaa lisätään tämän hetken linjausten mukaan, mutta myös uusiutuvaa sähköntuotantoa rakennetaan

maassamme maksimaalinen määrä. Viimeisessä luvussa kootaan yhteen tärkeimmät tulokset ja tehdään johtopäätöksiä niiden pohjalta.

2. Sähköntuotanto Suomessa

2.1 Sähkönkokonaistuotto ja sähköntuotantomenetelmät

Suomessa tuotettiin sähköä vuonna 2018 yhteensä 67,5 TWh [6]. Sähkön tuotanto kasvoi verrattuna edelliseen vuoteen 2,5 TWh, ja kasvusta suurin osa johtui lisääntyneistä fossiilisten polttoaineiden sekä turpeen käytöstä. Vuoden 2018 sähkön tuotantomäärät energialähteittäin on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Suomen Sähköntuotanto energialähteittäin (TWh) [6].

Uusiutuvien energialähteiden osuus kokonaissähkön tuotannosta oli 46,2 % ja toiseksi eniten energiaa tuotettiin ydinvoimalla 32 %, jolloin fossiilisten osuus energiantuotannosta oli enää 16 %. [6] Suomessa vuonna 2018 tuotetun sähkön lisäksi maahan tuotiin 19,9 TWh verran sähköä, mikä nostaa Suomen kokonaissähkönkulutuksen 87,5 TWh: iin.

Fossiilisilla polttoaineilla tarkoitetaan maan sisältä saatuja satoja miljoonia vuosia vanhoja hiilipohjaisia energianlähteitä, jotka ovat syntyneet hapettomassa ja kovapaineisessa tilassa. Vuonna 2018 fossiilisista polttoaineista sähköä tuotettiin kivihieillä (9 % kokonaistuotannosta), maakaasulla (6 %) ja öljyllä (0,3 %) [7]. Fossiilisten polttoaineiden käyttöä pyritään vähentämään energiantuotannossa niiden ilmaston lämpenemistä kiihdyttävän vaikutuksen takia. Ilmaston lämpeneminen johtuu fossiilisten energialähteiden

poltossa syntyvien savukaasujen sisältämistä aineista. Savukaasut sisältävät esimerkiksi hiilidioksidia, typen oksideja sekä muita pienhiukkasia, jotka sitovat lämpöä itseensä ilmakehään päästyään, mikä aiheuttaa maapallon ilmaston lämpenemisen. Suomen kasvihuonekaasupäästöt vuonna 2018 olivat 56,5 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttitonnia. Hiilidioksidiekvivalentti saadaan, kun kaikkien päästöjen määrät kerrotaan niiden ominaisella lämmityspotentiaalikerroimella ja tämän jälkeen ne summataan yhteen. [8]

Uusiutuvia energianlähteitä ovat vesivoima, tuulivoima, aurinkovoima sekä biopolttoaineet. Suomen uusiutuvasta sähkötuotannosta valtaosa tuotettiin vesivoimalla ja biope-
räisillä polttoaineilla, kun taas nopeimmin kasvava tuulivoima ja aurinkovoima jäävät vielä yhteensä alle 10 % Suomen kokonaissähkötuotannosta [7].

Suomen sähkönkulutus ei ole lisääntynyt merkittävästi kymmeneen vuoteen, vuonna 2008 Suomessa tuotetun sähkön määrä oli 74,5 TWh [9]. Sen sijaan uusiutuvien energianlähteiden käyttö lisääntyi kymmenessä vuodessa 10 % ja samaan aikaan fossiilisilla polttoaineilla tuotetun sähkön määrä väheni 11 %. Ero vuoteen 2008 selittyy kasvaneella tuulienergian määrällä, jota tuotettiin vuonna 2018 5,5 TWh enemmän kuin vuonna 2008. Ydinsähkön määrä on pysynyt kymmenen vuoden aikana lähes vakiona. [6][9]

2.2 Ydinvoima Suomessa

Suomessa on tällä hetkellä toiminnassa yhteensä neljä ydinvoimalaa. Ydinvoimaloista kaksi sijaitsee Loviisassa ja kaksi Olkiluodossa.

Loviisan reaktorit on otettu kaupalliseen käyttöön vuosina 1977 ja 1980, ja niillä on käyttöluvut vuosiin 2027 ja 2030 asti. Loviisan ydinvoimalat tuottivat sähköä yhteensä 8,2 TWh vuonna 2019, mikä vastaa noin 12,1 %:ia Suomen koko sähkön tuotannosta [10]. Olkiluodon reaktorit ovat valmistuneet vuosina 1978 ja 1980, ja niillä on käyttö lupa vuoteen 2038 asti. Olkiluodon ydinvoimalat tuottivat vuonna 2019 yhteensä 14,1 TWh, mikä vastaa noin 21 %:n osuutta Suomen kokonaissähkön tuotannosta. [11]

Jo olemassa olevien reaktoreiden lisäksi Suomeen on rakenteilla 5. reaktori, jonka määrä aloittaa kaupallinen toimintansa Olkiluodossa vuonna 2020. Laitoksen nettosähköteho tulee olemaan 1600 MW. [11] Ydinvoimaloiden keskimääräinen painotettu käyttökerroin, eli kuinka monta prosenttia laitos oli vuodesta käynnissä, vuonna 2019 oli 94 %, jota käyttämällä Olkiluoto 3:n vuotuiseksi sähköntuotannoksi voidaan arvioida noin 13,2 TWh vuodessa. Olkiluoto 3:n valmistuttua ydinvoimalla tuotetaan siis yhteensä noin 35,1 TWh sähköenergiaa, mikä vastaisi 40,3 %:ia Suomen vuoden 2018 sähkön kulu-
tuksesta.[6][10][11]

Taulukko 1. Suomen ydinvoimaloiden nettosähkötehot ja sähköntuotanto [10][11].

Ydinvoimala	Nettosähköteho (MW)	Sähköntuotanto 2018 (TWh)
Loviisa 1	507	4,1
Loviisa 2	507	4,1
Olkiluoto 1	890	7,5
Olkiluoto 2	890	7,2
Olkiluoto 3	1600	-

Ydinvoimaloita on tällä hetkellä maailmassa seitsemää pääreaktorityyppiä, joista yleisimmät ovat painevesireaktori (60 %) ja kiehutusvesireaktorit (20 %). Suomen reaktoreista molemmat Loviisan reaktorit ovat painevesireaktoreita ja Olkiluodon reaktorit (1 ja 2) ovat kiehutusvesireaktoreita. Olkiluoto 3:n reaktorityyppi tulee olemaan painevesireaktori.[10][11] Painevesireaktorin ja kiehutusvesireaktorin erona on se, että painevesireaktorissa polttoainesauvoja jäähdyttävä ja lämpöä niistä kuljettava vesi ei kiehu missään vaiheessa, koska veden painetta pidetään korkeana (Loviisan reaktoreissa vesi 123 bar paineessa), jolloin sen lämpötila voidaan nostaa 300 °C.[10][11][12] Kiehutusvesireaktoreissa jäähdytysveden paine on alempi (Olkiluodossa noin 70 bar), jolloin vesi höyrystyy kulkiessaan polttoainesauvojen ohi. [11][12]

2.3 Ydinvoiman hyödyt ja haitat

Ydinvoiman käyttö ja lisärakentaminen jakaa hyvin vahvasti mielipiteitä. Ydinreaktoreissa tai ydinpolttoaineiden käsittelyssä syntyvät vahingot ovat harvinaisia, mutta tapahtuessaan erittäin tuhoisia. Ydinonnettomuuksien seuraukset ulottuvat laajalle alueelle, ja niiden vaikutukset näkyvät ympäristössä ja ihmisissä pitkään. Lisäksi ydinvoimaloiden polttoaineena käytetty uraani on vaarallista ja aiheuttaa ympäristöönsä säteilyä vielä tuhansia vuosia sen käytön jälkeen [14]. Uraanin louhinnassa ja kuljetuksessa syntyvät ympäristöhaitat sekä päästöt tulee myös ottaa huomioon ydinvoiman käytön järkevyyttä arvioitaessa.

Ydinvoimaloiden polttoainejätteet aiheuttavat ympäristöriskin. Polttoaineiden säteilypitoisuudet pysyvät ympäristölle haitallisina tuhansien vuosien ajan, jolloin niiden vuorovaikutusta ympäristön kanssa pyritään estämään mahdollisimman pitkäksi aikaa [5]. Käytetty ydinpolttoaine onkin useassa maassa suunniteltu sijoitettavaksi syvälle maan

sisään. Suomi on maailman ensimmäinen maa, joka on päättänyt ratkaista ydinpolttoaineen loppusijoituksen. [5] Suomessa ydinpolttoaineiden loppusijoituksesta vastaa TVO:n ja Fortumin perustama Posiva Oy, joka on perustettu nimenomaan huolehtimaan Suomen ydinvoimaloissa syntyvän ydinjätteen loppusijoituksesta. [14]

Suomen ydinvoimaloiden ydinjätteiden loppusijoitus alkaa 2020-luvulla Olkiluotoon maan alle rakennettuun ydinjätteiden loppusijoituspaikkaan, ONKALO:on [14]. ONKALO:n rakentamisen Posiva aloitti jo vuonna 2004 maaperän tutkimuksia varten. Vuonna 2012 Posiva jätti rakentamislupahakemuksen ydinpolttoaineen loppusijoituspaikasta valtioneuvostolle, ja rakennuslupahakemus hyväksyttiin vuonna 2015. Käyttölupahakemuksen Posiva jättää vuoden 2020 aikana, jonka jälkeen loppusijoittaminen voidaan aloittaa. Loppusijoituspaikasta on tarkoitus tulla 450 metriä syvä, peruskallioon kaivettu luolastoverkko, joka on tämänhetkisissä suunnitelmissa tarkoitus sinetöidä 2120-luvulla. Ennen kuin ydinjätteet voidaan tuoda loppusijoituspaikalle, niiden täytyy antaa jäähtyä yli 40 vuotta. [14] Tällä hetkellä Suomen ydinvoimaloiden käytetyt polttoaineet ovat jäähtymässä ja säilytyksessä vesialtaissa ydinvoimaloiden reaktorihalleissa [10]. Myös esimerkiksi Ranska ja USA ovat suunnitelleet käytetyn ydinpolttoaineen varastointia syvälle maan sisään [15].

Ydinvoimalla on kuitenkin riskien lisäksi todella paljon vahvuuksia verrattuna muihin energiantuotantomuotoihin. Ydinvoiman CO₂-päästöt ovat saatavaan energiamäärään nähden pienet, joten ydinvoima on yksi vaihtoehtoista ympäristön lämpenemisen estämiseksi. Ydinvoimassa käytettävän polttoaineen uraanin tarve tuotettua sähkötehoa kohti on pienempää kuin fossiilisten polttoaineilla, ja sitä on saatavilla enemmän kuin esimerkiksi öljyä ja hiiltä. [5] Lisäksi ydinvoiman käyttö parantaa ilman laatua laitoksen lähellä muutenkin kuin pelkkien CO₂-päästöjen yhteydessä, esimerkiksi vähentyneiden pienhiukkaspäästöjen muodossa [5]. Ydinvoimalat toimivat Suomessa yli 90 % käyttöasteella, joten tehtaiden tuottotvarmuus on todella korkea. [10][11]. Ydinvoimaloiden sähköntuottomäärää on myös mahdollista säätää, mutta tähän päivään mennessä Suomen ydinvoimaloiden säätöä ei ole vielä juurikaan huoltokatkosten lisäksi tehty, toisin kuin esimerkiksi Saksassa, jossa ydinvoimaloiden tehon säätely on jo yleisempää. [16]

2.4 Ydinvoiman taloudellinen puoli

Ydinvoimassa noin 60 % kokonaiskuluista syntyy voimalan rakentamisen aikana, polttoaineen varastoinnin ollessa toiseksi suurin kuluerä [5][17]. 1650 MW:n ydinvoimalan hinta on Suomessa noin 5,95 miljardia euroa, jos se rakennetaan jo olemassa olevan

ydinvoimalan läheisyyteen, tai 8,15 miljardia jos se rakennetaan kokonaan uuteen paikkaan [17]. Olkiluoto 3:n rakennusprojektin hinta on kuitenkin projektin epäonnistumisen ja viivästymisen takia kasvanut jo tähän mennessä noin kaksinkertaiseksi suunnitellusta.

Ydinvoimaloissa syntyvän ydinjätteen käsittely ja loppusijoitus kuuluu kokonaisuudessaan ydinvoimayhtiöille, ja Suomessa syntynyt ydinjäte on aina loppusijoitettava Suomeen [11][18]. Ydinjätteiden loppusijoituksen rahoituksesta huolehtii Työ- ja elinkeinoministeriön alaisuudessa toimiva valtion ydinjäterahasto, jonne kerätään varat ydinjätehuoltoveliisilta eli ydinsähkön valmistajilta.

Ydinvoima on lisäksi suuri työllistäjä Suomessa ja maailmalla. IPCC:n selvityksen mukaan 50 000 MW ydinvoiman lisääminen lisäisi suorasti 117 000 ja epäsuorasti 250 000 työpaikkaa maahan. [5]

3. Saksan ydinvoimasta luopuminen

3.1 Saksan historia ydinvoimassa

Saksassa päätös ydinvoimasta luopumisesta tehtiin ensimmäisen kerran jo vuonna 2000. Ydinvoimasta luopumista puolsi siihen aikaan fossiilisten polttoaineiden alhaiset hinnat, sekä ydinvoimaan liittyvät riskit [19]. Saksan ja Suomen energiantuotantojakaumat muistuttivat hyvin paljon toisiaan ennen Saksan päätöstä ydinvoimasta luopumiselle, joten Saksaa voidaan pitää hyvänä vertailukohtana, kun ennustetaan ydinvoiman käytön lopettamisen vaikutuksia Suomelle. [9][20]

Alkuperäinen suunnitelma Saksalla oli sulkea kaikki ydinvoimalat vuoteen 2022 mennessä. Vuonna 2010 Saksan hallitus kuitenkin päätti, että ydinvoiman käyttöä jatketaan ainakin vuoteen 2036 asti, koska hallitus pelkäsi ydinvoimaloiden sulkemisen johtavan kohonneeseen sähkönhintaan sekä suureen työttömien määrään. Vuoden 2011 Japanin Fukushimaa tapahtuneen ydinonnettomuuden vuoksi Saksan hallitus palasi kuitenkin alkuperäiseen suunnitelmaansa sulkea kaikki maan ydinvoimalat viimeistään vuonna 2022. [4]

Fukushiman jälkeen Saksa sulki välittömästi kahdeksan käytössä olleista seitsemästoista ydinvoimalaitoksestaan, mikä vastasi noin 10 GW kapasiteettia. Tämän kapasiteettivajeen Saksa paikkasi pienentämällä vientisähkön määrää sekä ottamalla suljettuna ollutta fossiilisen sähköntuotannon kapasiteettia käyttönsä. [21]

Saksa on mukana EU:n 20–20–20 projektissa mikä tarkoittaa, että maan on tarkoitus vähentää CO₂-päästöjään 20 %, tuottaa 20 % maan energiasta uusiutuvilla energialähteillä sekä nostaa energiatehokkuuttaan 20 % vuoteen 2020 mennessä. Tämän lisäksi Saksan hallitus asetti sen omiksi tavoitteeksi kasvihuonekaasujen laskemisen 85 % sekä uusiutuvasti tuotetun sähkön määrä tulisi ylittää 80 % koko tuotetusta sähköstä vuoteen 2050 mennessä. Ydinvoiman puolustajat kritisivat lopettamista laajalti, sillä sen pelättiin lisäävän kivihiilen käyttöä sähkön tuotannossa ja täten nostavan entisestään Saksan CO₂ ja muita kasvihuonepäästöjä. [19]

3.2 Saksan sähkönhinnan muutos

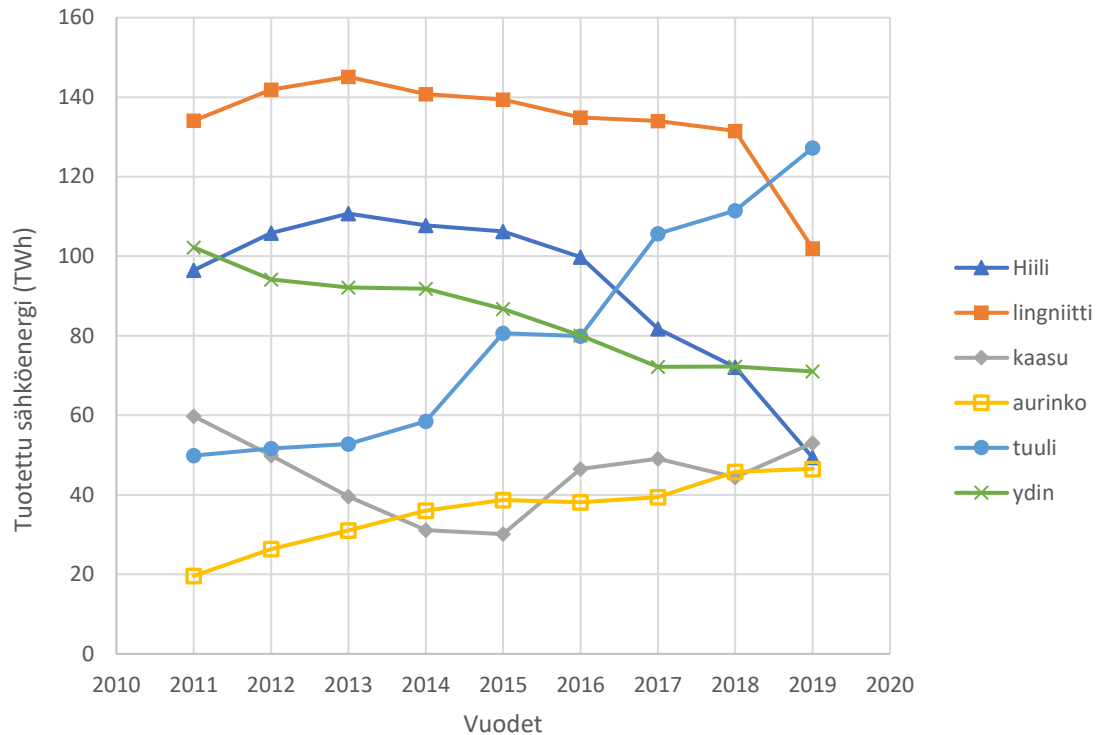
Saksassa sähkönhintaa kotitalouksille oli vuoden 2019 ensimmäisen puolikkaan aikana kautta-aikain korkeinta. Sähkön hinta oli verojen jälkeen 0,31 €/kWh, kun esimerkiksi Suomessa sähkö maksoi 0,17 €/kWh ja EU:n keskiarvohinta oli 0,22 €/kWh saman ajanjakson aikana. [22] Vielä vuoden 2011 ensimmäisellä puoliskolla Saksan sähkönhintaa oli

0,25 €/kW [23]. Hinnan nousua olisi helppo selittää ydinvoiman voimakkaalla vähentämisellä, mutta se ei kuitenkaan ole koko totuus nousseen sähkönhinnan taustalla. Saksa on muuttanut voimakkaasti verotustaan sähkön suhteen 2000-luvulla. Esimerkiksi uusiutuvan energian käytön lisäämiseksi kerättävä EEG-vero, eli uusiutuvien käytön tukemista varten sähkön hinnan ohessa kerättävä lisämaksu, on noussut vuoden 2006 arvosta 1 snt/kWh arvoon 6 snt/kWh vuoteen 2014 mennessä. Kokonaisuudessaan Saksassa peritty vero sähköstä on noussut arvosta 8,6 snt/kWh (2006) arvoon 14,5 snt/kWh (2014).[20]

Samaan aikaan kun Saksa on kiristänyt verotustaan ja luopunut ydinvoimasta, sähkön spot-hinta on itse asiassa pienentynyt. Spot-hinnalla tarkoitetaan tässä työssä sähkön valmistuskustannuksia, eli sähkön hintaa ilman veroja tai siirtokustannuksia. Saksan vähentäessä ydinvoimalla tuotetun sähkön määrää sen markkinoilla, sähkön spot-hinta on ollut tasaisessa laskusuunnassa. Vuoden 2008 spot-hinnasta oli tultu alaspäin yli 60 % vuoteen 2014 mennessä. Tämän lisäksi sähkön spot-hintaan ei ole tullut enää voimakkaita hinnan muutoksia vuoden 2008 jälkeen. [19] Ilman kiristynyttä verotusta sähkön hinta ei siis olisikaan noussut Saksassa, vaan se olisi pikemminkin laskenut. Vuonna 2019 Saksan sähkön spot-hinta oli 36,64 €/MWh, kun vuonna 2011 se oli 57,05 €/MWh. Ydinvoiman vähentämisellä ei siis ole ollut vaikutusta sähkön valmistushinnan nousuun, joskin halvin spot-hinta oli vuonna 2016, jolloin se oli hinnaltaan 29,55 €/MWh. [20] Kokonaisuudessaan hinta on kuitenkin laskenut ydinvoiman vähentämisen aikana, ja parin vuoden hinnan noususta on vielä vaikea sanoa, onko nousu pysyvää ja johtuuko se juuri ydinvoiman vähentämisestä.

3.3 Korvaava energiantuotanto

Saksassa ydinvoiman aiheuttamaa energiantuotantovajetta on korvattu sekä uusiutuvilla- että fossiilisilla energiamuodoilla. Kuvassa 1 on esitetty Saksan sähköntuotanto energialähteittäin vuosina 2011–2014.



Kuva 2. Saksan sähköntuotannon määrä, ruskohiili, kivihiili maakaasu, aurinkovoima, tuulivoima ja ydinvoima (TWh) [20].

Saksa tuotti vuonna 2019 yhteensä 31 TWh vähemmän ydinvoimalla tuotettua sähköä, kuin vuonna 2011. Vuosina 2011, 2012 ja 2013 Saksassa lisättiin ruskohiilen ja kivihiilen määrää energiantuotannossa. Vuonna 2011 ruskohiilellä tuotettiin 134 TWh ja kivihiilellä 96,5 TWh sähköä. Vuonna 2013 arvot olivat huipuissaan, jolloin ruskohiilellä tuotettiin 145 TWh ja kivihiilellä 111 TWh sähköä. Lisäksi vuosien 2011 ja 2013 välillä uusiutuvilla tuotettu sähkönmäärä nousi 11 TWh. Saksa tuotti myös 16 TWh vähemmän sähköä vuonna 2013 kuin vuonna 2010. Vuoden 2013 jälkeen ruskohiilen ja kivihiilen käyttö kääntyi laskuun, ja vuonna 2019 niillä tuotettiin enää 102 TWh ja 49 TWh sähköä. Samaan aikaan uusiutuvansähkön määrä on kokonaisuudessaan kasvanut 90 TWh. [20]

Ilmastoa paljon kuormittavien fossiilisten rusko- ja kivihiilen käyttö ei siis noussut kuin vuoteen 2013 asti. Tämän jälkeen niiden osuus sähköntuotannossa on vähentynyt pääosin lisääntyneellä uusiutuvien energialähteiden ja maakaasun käytöllä.

3.4 Vaikutus kasvihuonepäästöihin

Saksan sähköntuotannosta aiheutuneita kasvihuonepäästöjä laskettaessa käytettiin Tilastokeskuksen arvoja eri fossiilisten polttoaineiden kasvihuonekaasujen kertoimille sekä IPCC:n raporttia [5]. Käsiteltävien polttoaineiden päästökertoimet on esitetty taulukossa 1

[17][24]. Työssä käsitellään vain kolmen suurimman fossiilisen polttoaineen päästöjä, koska niiden käyttö on sähköntuotannossa ylivoimainen CO₂ päästöjen aiheuttaja. Taulukossa esitetyt päästö arvot ottavat huomioon muutkin kuin hiilidioksidipäästöt, esimerkiksi maakaasun siirrossa vapautuvat metaanipäästöt.

Taulukon arvojen avulla voimme laskea, kuinka paljon ydinvoiman lakkauttamispäätöksen jälkeisten vuosien CO₂-päästöt ovat vaihdelleet.

Taulukko 2. Eri polttoaineiden CO₂-päästökertoimet. [17][24]

Polttoaine	CO ₂ -päästökerroin [kg/MWh]
Kivihiili	335,2
Maakaasu	199,1
Ruskohiili	388,8
Vesivoima	24
Öljy	73,1
Biomassa	230
Ydinvoima	12
Tuuli (maalla)	11
Aurinko	41

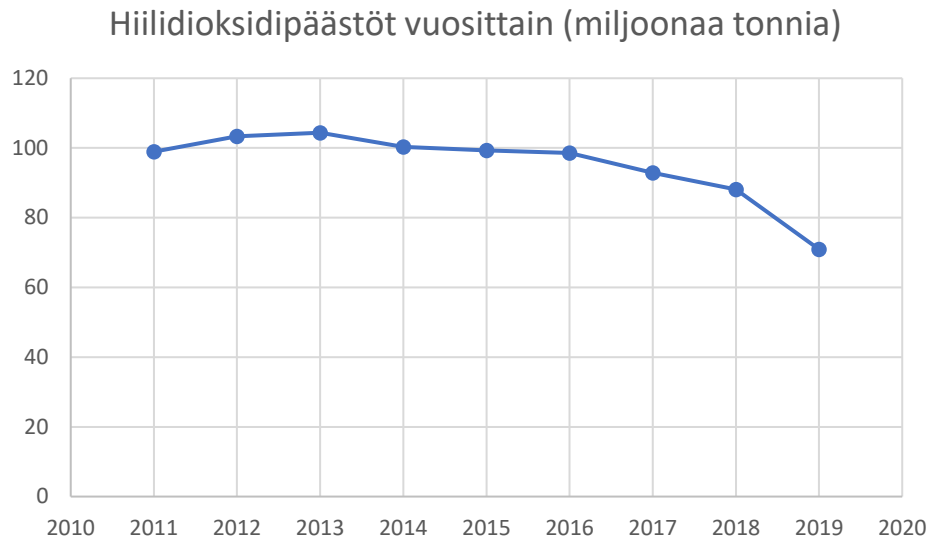
Saksassa öljyn käyttö sähköntuotannossa ei ole juurikaan muuttunut 2010-luvulla, joten työssä sen vaikutukset jätetään huomiotta Saksan päästöjen muutoksen tutkimisessa.

Työssä kunkin sähköntuotantotavan aiheuttamat päästöt, E , laskettiin kaavalla

$$E = P_a * X_a, \quad (1)$$

missä P_a on tuotettu sähkön määrä energialähteellä, ja X_a on taulukosta 1 saatu energialähteen päästökerroin. Tämän jälkeen lasketut päästöt summattiin yhteen, mistä saatiin kokonaispäästöjen määrä.

Laskelmien tulokset mukailevat vahvasti kuvassa 2 esitettyjen energialähteiden käyttömäärien mallia. CO₂-päästöjen kehitys edellä mainittujen sähköntuotantomuotojen suhteen mitattuna osoitetaan kuvassa 3.



Kuva 3. Saksan CO₂-päästöt vuosittain [20].

Kuvasta nähdään, että vuoden 2011 jälkeen CO₂-päästöt sähköntuotannossa kohoavat vuoteen 2013 asti. Tämän jälkeen Saksan CO₂-päästöt sähköntuotannossa pysyvät tasaisena, kunnes ne lähtevät putoamaan jyrkemmin vuoden 2016 jälkeen. Kokonaisuudessaan CO₂-päästöt putosivat vuosien 2011 ja 2019 välillä 28,3 %, joskin vuosien 2011 ja 2013 välillä ne nousivat 5,5 %.

4. Uusiutuvien energianlähteiden rajoitukset

4.1 Vaihteleva saatavuus ja varastointitekniikat

Uusiutuvien energianlähteiden käytön yleistymisen huono puoli sähkön tuotannossa on niiden epävakaa saatavuus. Tämä koskee erityisesti sähkön tuottamista aurinko- ja tuulivoimalla. Aurinko- ja tuulivoima ovat riippuvaisia vallitsevista sääolosuhteista ja vuodenajoista, joten ainoat helposti varastoitava uusiutuvat energianlähteet Suomessa ovat bio- ja vesivoima [5]. Koska uusiutuvilla saatavaa sähköntuotantoa ei voida ajoittaa vastamaan tarvetta, tulevaisuudessa sähkön varastointi sekä älykkäät energiaratkaisut tulevat nousemaan suureen rooliin [25].

Tällä hetkellä Suomessa ja maailmalla käytettävistä sähkön varastointimenetelmistä yleisempiä ovat pumppuvoimalaitokset, paineilmaparastot sekä erilaiset akut. Pumppuvoimalaitoksissa vettä pumpataan alemmasta vesivarastosta ylempään sähkön ollessa halpaa, jolloin veteen varastoidaan potentiaalienergiaa. Kun sähköä tarvitaan käyttöön, vesi lasketaan alas, jolloin pumppuvoimalaitos toimii tavallisen vesivoimalan tapaan. Paineilmaparastossa ilmaa puristetaan kasaan kovaan paineeseen, ja sähkön hinnan noustessa sähköä tuotetaan varastossa paineen purkamisen avulla. Akuista tällä hetkellä Suomessa ja EU-maissa käytetyimpiä ovat Litiumakut. [25]

4.2 Suomen varastointipotentiaali

Suomessa sähköenergian varastointi on nykyisellä tekniikalla haastavaa. Maailman ylivoimaisesti käytetyin varastointimenetelmä pumppuvoimalaitos vaatii suuria korkeuseroja, joita Suomessa ei juurikaan ole, Lappia lukuun ottamatta [25]. Pumppuvoimalat ovat tällä hetkellä ainoa tapa varastoida suuria määriä energiaa, eikä muilla tekniikoilla ole vielä mahdollista paikata uusiutuvilla tuotetun sähkön määrän vaihtelua. Suomeen on suunnitteilla maan ensimmäinen pumppuvoimalaitos nimeltään Callio, Pyhäjärvelle vanhan kaivoksen tilalle. Kaivoksen toiminta aiotaan lopettaa kokonaan vuonna 2021, jonka jälkeen pumppuvoimalan rakentaminen voidaan aloittaa. [26]

Tulevaisuudessa on mahdollista, että akuilla saadaan varastoitua suuriakin määriä energiaa. Tämä kuitenkin vaatii akkutekniikan kehittymistä sekä akkujen hintojen voimakasta pienenemistä. Akkujen hintakehitys näyttää lupaavalta, vuosien 2010 ja 2016 välillä Litiumioniakkujen keskimääräinen hinta putosi 73 %. Vuonna 2016 Litiumioniakkujen hinnat olivat vielä 273 \$/kWh, eli sähkön varastointi kustannukset akkutekniikkaa käyttäen on vielä todella korkeat. [25]

4.3 Maksimaalinen uusiutuvien määrä

Suomen nykyinen energiainfrastruktuuri ja käytössä olevat tekniikat eivät mahdollista nopeaa siirtymää vain uusiutuvilla energianlähteillä toimivaan yhteiskuntaan. Zakeri et al. tutkivat, kuinka suuri osa Suomen sähköstä on mahdollista tuottaa pelkästään uusiutuvilla energianlähteillä, ilman että tehdään suuria ja kalliita investointeja energian varastointia varten [27]. Tuulivoiman maksimaaliseksi tuotantoarvoksi saatiin 19 % Suomen sähköntuotannosta vuoden 2012 kokonaismäärästä, mikä vastaa 16 TWh/a. Aurinkoenergialle vastaava määrä oli 7,6 % mikä vastaa 5,6 TWh/a. Vesi- ja bioenergia eivät vaadi lisäyksiä energian varastointiin, mutta niitä rajoittavat muut tekijät. Suomessa vesistöjen juoksutusmääriä valvotaan tarkasti, ja suurin osa mahdollisista energiantuotantopaikoista on jo valjastettu käyttöön. Bioenergian puolella metsähakkuiden määrä, tekninen osaaminen sekä taloudellinen kannattavuus ovat rajoittavia tekijöitä. Vesivoimalla tuotetun sähkön maksimaalinen lisäys on 500–600 MW, mikä 5000 tunnin huipunkäyttöajalla vastaa noin 2,5–3 TWh lisäystä sähkön vuosittaiseen tuotantoon. Tässä työssä käytetään 520 MW vesivoiman lisäystä, eli 2,6 TWh, jolloin uusiutuvien määrän lisäykset saadaan yhtä suureksi tämänhetkisen ydinvoiman tuotannon kanssa. Vesivoimasta saatavaan sähkön määrään vaikuttaa kuitenkin hyvin paljon se, millainen vesivuosi on kyseessä. [27] Biopolttoaineilla valmistettavaa sähkön määrää voidaan kasvattaa maksimissaan 4,3 TWh. Bioenergiälähteitä tullaan tulevaisuudessa käyttämään yhä enemmän myös lämmitykseen ja liikenteen polttoaineiksi, mikä rajoittaa potentiaalia sähkön valmistukseen.[6][9][27]

Kun vertamme uusiutuvien maksimaalisia määriä ja vuonna 2018 jo käytössä olevia uusiutuvia saadaan tuulienergian lisäys potentiaaliksi 10,2 TWh ja aurinkoenergialle 4,7 TWh. Yhteensä aurinko- vesi- bio- ja tuulisähkön määrää on mahdollista lisätä vielä 21,7 TWh. [6][27] Tämä jättää fossiilisilla polttoaineilla korvattavan energiamäärän lähelle nollaa. Uusiutuvista saatavat vuosittaiset sähkömäärät vaihtelevat kuitenkin suuresti biosähköä lukuun ottamatta.

Olkiluoto 3:n valmistuminen tulee kuitenkin laskemaan maksimaalisia aurinko- ja tuulienergia määriä, koska uuden ydinvoimalan valmistuttua säätövoiman tarve lisääntyy, jotta sähköntuotanto saadaan vastamaan kysyntää. Olkiluoto 3:n valmistumisen jälkeen maksimaalinen aurinkoenergian määrä on 4,6 TWh ja tuulienergian määrä 13 TWh vuodessa. Vesi- ja biosähköä voidaan lisätä saman verran kuin ilman ydinvoiman kasvua, koska niiden sähköntuotantoa on helppo säädellä. [27]

5. Ydinvoiman korvaaminen Suomessa

5.1 Suomen tämän hetken energiatavoitteet

EU:n tavoitteiden lisäksi Suomen valtio on asettanut itselleen tavoitteita ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Suomen tavoitteena Juha Sipilän hallituksen laatimassa selvityksessä on nostaa uusiutuvilla tuotetun energian määrä vastaamaan 50 % Suomen kokonaisenergian tuotannosta 2020-luvulla. Tämän lisäksi Suomen omavaraisuus energiantuotannossa tulisi olla yli 55 % 20-luvun loppuun mennessä. Kivihiilen käytöstä Suomen tavoitteena on luopua lähes kokonaan vuoteen 2030 mennessä. Kivihiilellä tuotetaan lämpöä ja sähköä tästä eteenpäin lähinnä varavoimana noin 3–7 TWh vuodessa. Sipilän hallituksen suunnitelmissa ydinvoima kattaa tulevaisuudessakin suuren osan Suomen energiantuotannosta. [3]

Jos ydinvoimasta luovuttaisiin korvaava energiantarve täytyisi tuottaa joko kokonaan uusiutuvilla tai fossiilisilla energiantuotantomenetelmillä, tai näiden kahden yhteistuotannolla, mikä on todennäköisin vaihtoehto. Erilaisten korvausvaihtoehtojen kustannus- ja ympäristövaikutuksia tarkastellaan seuraavissa luvuissa.

5.2 Sähköntuotannon hinnan muutokset

Ydinvoimalla tuotetun sähkön hinta on Suomessa halpaa verrattuna suurimpaan osaan vaihtoehtoisista tuotantomuodoista. Lappeenrannan teknillinen yliopisto selvitti vuonna 2017 sähköntuotantokustannukset eri voimalaitostyypeille. Tutkimukseen otettiin mukaan ydinvoima, tuulivoima merellä ja maalla, aurinkovoima, turvevoima, maakaasuvoimalaitos, kivihiililauhdevoimalaitos ja puulauhdevoimalaitos. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 2. [13] Vesivoimalla vastaavat arvot saatiin IRENAN raportista vuodelta 2012 [28]. Taulukkoon on myös kirjattu ylös kunkin energiantuotantomuodon vaatiman ominaisinvestoinnin suuruus, jotta energiamuodon hyödyntämiseen vaadittava laitos voitaisiin rakentaa.

Taulukko 3. Eri sähköntuotantomuotojen kustannukset (€/MWh) ja huipunkäyttöajat (h)[13][28].

Kustannus komponentti	Ydinvoima	Maakaasu	Vesi	Hiili	Turve	Puu	Aurinko	Tuuli
Pääomakustannukset	26,27	8,73	69,93	23,95	17,44	18,33	84,71	33,74
Käyttö- ja kunnossapito	10,41	7,03	12	16,62	10,49	6,89	14,85	7,70
Polttoaine	5,68	48,03	0	33,78	33,50	51,00	0	0
Päästökauppa	0	5,09	0	1,59	14,30	0	0	0
Yhteensä	42,36	68,89	81,93	75,93	75,73	76,22	99,56	41,44
Ominaisinvestointi (€/kW)	3606	985	6000	2700	1967	2067	1080	1360
Huipunkäyttöaika (h)	8000	8000	5000	8000	8000	8000	982	2860

Sähkön tuottaminen ydinvoimalla on toiseksi halvin vaihtoehto 42,4 €/MWh, jota halvempaan on vain tuulisähkö 41,44 €/MWh. Kalleimmat vaihtoehdot olivat vesi- ja aurinkosähkö, mikä selittyy niiden alhaisilla huipunkäyttöajoilla sekä isoilla alkuinvestointitarpeilla. Vesivoimaloiden huipunkäytönaikana käytettiin 5000 tuntia vuodesta, tuulivoiman 2860 tuntia, aurinkovoiman 982 tuntia ja lopuille 8000 tuntia. Tutkimuksessa ei otettu huomioon energian varastointikustannuksia, jotka nostaisivat varsinkin tuuli- ja aurinkosähkön hintaa. [13]

5.3 Maksimaalinen uusiutuvilla korvaaminen

Kun otetaan huomioon Suomen tavoitteet hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen ja omavaraisuuden nostamisen suhteen, paras keino korvata ydinvoima ja toteuttaa näitä tavoitteita on lisätä mahdollisimman paljon uusiutuvien määrää sähköntuotannossa. Luvussa 4.3 esitettiin, kuinka nykyinen ydinvoimantuotanto voidaan korvata kokonaan uusiutuvilla energianlähteillä, ja kyseiset luvut on koottu uudestaan taulukkoon 4. Korvaamisesta aiheutuvat kustannukset voidaan laskea taulukossa 4 esitettävien uusiutuvien lisäystarpeen, sekä taulukon 3 eli sähköntuotantomuotojen kustannusten avulla. Tulokset esitetään kolmessa osassa: pääomakustannukset, käyttökustannukset ja ominaisinvestoinnit. Pääomakustannuksilla tarkoitetaan kustannuksia, jotka syntyisivät uusien

sähköä tuottavien voimaloiden rakentamisesta per vuosi. Käyttökustannukset tarkoittavat valmiin voimalan käytöstä aiheutuvia kustannuksia, joita syntyy myös jo olemassa olevista ydinvoimaloista. Ominaisinvestointi kertoo, paljonko korvaavan energianfran rakentaminen ja käyttöönotto maksaisi kokonaisuudessaan.

Pääomakustannukset energialähteittäin, K_a , saadaan kaavasta

$$K_a = P_a * M, \quad (2)$$

missä P_a on kyseisellä energianlähteellä tuotettu sähkön määrä (TWh) ja M on taulukosta 2 saatu energianlähteen pääomakustannus (€/MWh). Lopuksi eri energianlähteistä aiheutuvat kustannukset summataan yhteen, jolloin saadaan tarvittava kokonaispääomakustannus vuotta kohden.

Käyttökustannukset energialähteittäin, K_b , puolestaan saadaan kaavasta

$$K_b = P_a * N, \quad (3)$$

missä N on energianlähteen käytöstä aiheutuvien käyttö-, kunnossapito- ja polttoainekustannusten sekä päästökaupasta aiheutuvien kustannusten summa, jotka saadaan taulukosta 3. Eri energianlähteistä saadut käyttökustannukset summataan yhteen ja niistä vähennetään ydinvoiman käyttökustannukset, jolloin saadaan käyttökustannusten muutos nykyiseen tilanteeseen.

Uusien investointien vaatima ominaisinvestoinnin suuruus, K_c , voidaan laskea kaavalla

$$K_c = P_a / t * O \quad (4)$$

missä t on energianlähteen huipunkäyttöaika taulukosta 3 (h) ja O on taulukossa 3 esitetty ominaisinvestointi energialähteelle. Saadut tulokset esitetään taulukossa 4.

Taulukko 4. Ydinvoiman korvaaminen uusiutuvilla, korvaavat energiamuodot ja niiden aiheuttamat kustannukset

Energialähde	Korvaava määrä (TWh)	Pääoma kustannukset (miljoonaa €)	Ominaisinvestointi (miljoonaa €)	Käyttö kustannukset (miljoonaa euroa/vuosi)
Vesi	2,6	182	3 120	31,2
Bioenergia	4,3	79	1 111	248,927
Aurinko	4,7	398	5 169	69,795
Tuuli	10,2	344	4 850	78,54
Ydinvoima (nykyinen)	21,8	0	0	350,762
Hinnan lisäys	-	1 003	14 250	77,7

Yhteensä pääomakustannuksiksi ydinvoiman korvaamiselle kokonaan uusiutuvilla energianlähteillä tulisi 1 003 miljoonaa euroa vuotta kohti. Uusiutuvilla tuotetun energian käyttökustannukset olisivat vuosittain 77,7 miljoonaa euroa korkeammat, joten kustannukset nousisivat 1 081 miljoonaa euroa vuodessa. Ominaisinvestoinnin arvoksi saadaan 14, 25 miljardia euroa.

Vaikutus Suomen CO₂-päästöihin laskettiin taulukon 2, eli energialähteiden hiilidioksidipäästökerrointen, ja taulukon 4, eli kunkin uusiutuvan energialähteen lisääntyneen määrän avulla. Kun tiedot lasketaan kaavan 1 mukaan saadaan tulokseksi, että Suomen CO₂-päästöt nousisivat 1,09 miljardia kilogrammaa, jos ydinvoima korvattaisiin kokonaan uusiutuvilla. Suomen kokonaispäästöihin luku vastaa 2 % nousua, eli vaikutus ei olisi kovinkaan suuri. Suurin osa lisääntyneistä päästöistä selittyy biosähkön lisääntyneestä määrästä sähkön tuotannossa.

5.4 Taloudellisesti halvin vaihtoehto

Taloudellisesti edullisin vaihtoehto ydinvoiman korvaamiseen olisi sen korvaaminen tuuli- ja maakaasulla tuotetulla sähköllä. Maakaasuvoiman käyttöönottoa edullisuuden lisäksi puoltaisi sen muita fossiilisia polttoaineita pienemmät CO₂-päästöt, kuten taulukossa 2 on esitetty. Huonona puolena Suomen tavoitteita kohtaan on kuitenkin maakaas-

suesiintymien puuttuminen Suomesta, jolloin Suomen olisikin lisättävä energiantuontiin voimakkaasti verrattuna uusiutuvilla tai ydinenergialla tuotettuun sähköenergiaan. Maakaasulla tuotettua sähkömäärää on nopea ja helppo muuttaa, joten suuria energia-varastoja ei sen kanssa tarvittaisi.

Koska tuulivoima on halvin ja ympäristöystävällisin energiantuotantomuoto, tässäkin skenaariossa sitä hyödynnetään maksimaalisen paljon eli 10,2 TWh. Loput 11,6 TWh tuotettaisiin ulkomailta tuodulla maakaasulla. Suomessa on jo valmiita kaasulaitoksia 3,5 TWh sähköenergian tuottamiseen, joten maahan tarvitaan 7,7 TWh uutta kaasusähköä. Laskuissa käytetyt energia määrien lisäykset maakaasulle ja tuulivoimalle on esitetty kootusti taulukossa 5.

Käyttämällä kaavaa 2 ja taulukosta 3 saatuja pääomainvestoinnin arvoja maakaasulle ja tuulivoimalle, saadaan tälle skenaariorille pääomakustannuksiksi 445,4 miljoonaa euroa vuodessa. Käyttökustannukset voidaan laskea kaavan 3 ja taulukosta 3 saatujen käyttö-, kunnossapito-, polttoine-, ja päästökaupankustannusten avulla. Käyttökustannusten arvoksi saadaan 425,52 miljoonaa euroa vuodessa enemmän, kuin nykyisellä ydinvoimalla toimivassa energiantuotannossa. Yhteensä tällä mallilla ratkaistu ydinvoimasta luopuminen lisäisi kustannuksia siis 870,9 miljoonaa euroa vuotta kohden. Ominaisinvestointien määräksi saadaan kaavan 4 ja taulukon 3 avulla 6,279 miljardia euroa, mikä on yli puolet pienempi määrä, kuin uusiutuvilla tapahtuvassa korvaamisessa. Laskennan tulokset on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. Ydinvoiman korvaaminen tuuli- ja maakaasusähköllä.

Energia- muoto	Lisäys- tarve (TWh)	Pääomakustan- nukset (miljoonaa euroa)	Käyttökustan- nukset (miljoonaa euroa)	Ominaisinvestoinnit (miljoonaa €)
Tuulivoima	10,2	344,2	78,5	4 850,3
Maakaasu	7,7	101,3	697,7	1 428,3
Ydinvoima	-	-	350,8	-
Yhteensä	21,8	445,4	425,5	6 278,6

CO₂-päästöjä kyseinen malli tuottaisi Suomessa 2,16 miljardia kilogrammaa enemmän kuin nykyinen tilanne. Määrä on siis melkein kaksinkertainen verrattuna siihen, että ydinvoima korvattaisiin uusiutuvilla energianmuodoilla, ja muutos nostaisi Suomen kokonaispäästöjä 3,8 %. Tämän lisäksi maakaasusta syntyviä CO₂-päästöjä ei saada helposti si-
dottua uusiin hiilinieluihin, toisin kuin puupolttoaineissa.

5.5 Ydinvoiman ja uusiutuvien maksimaalinen käyttö

Viimeisenä työssä verrataan nykyistä sähköntuotannon tilannetta mahdolliseen tulevaisuuden tilanteeseen, jossa Suomen nykyiseen ydinvoimakapasiteettiin lisätään Olkiluoto 3:n arvioitu sähköntuotantomäärä, ja sen lisäksi Suomessa tuotetaan uusiutuvaa sähköä maksimaalinen määrä. Olkiluoto 3:n avaaminen nostaa ydinvoiman profiilia sähköntuotannosta entisestään, ja sitoo Suomen yhä vahvemmin ydinvoimaan nojaavaksi valtioksi. Kun lasketaan uusi kasvanut ydinvoiman kokonaismäärä sekä uusiutuvien maksimaalisen määrän summa, saadaan että Suomessa tuotetaan yhteensä 85 TWh vähähiilidioksidista sähköä.

Sähkönhintaan lisäinvestointikustannuksia aiheuttaisi nyt uusiutuvien lisäksi uuden ydinvoimalan rakennuksesta aiheutuvat kulut. Koska Olkiluoto 3:n lopullinen hinta ei ole vielä selvillä, työssä käytetään taulukon 3 arvoja, vaikka todellisuudessa ydinvoimalan kustannukset saattavatkin nousta paljon odotettua korkeammaksi. Lisäksi tulokset lasketaan myös skenaariossa, jossa Olkiluoto 3:n pääomakustannukset arvioidaan kaksinkertaisiksi taulukon 3 arvoista.

Loppu sähkö, jota ei voida tuottaa uusiutuvilla, tuotettaisiin maakaasulla, jolloin energiantuotanto kivihiilellä ja turpeella voitaisiin lopettaa kokonaan. Lisääntyneen tuuli- ja aurinkosähkön osuuden takia Suomen sähköntuotantomääristä tulisi nykyistä vaihtelevampia. Vaihtelun takia Suomen sähkön tuotantoa pitäisi tasata enemmän viennin ja tuonnin avulla. Yksinkertaisuuden vuoksi työssä oletettiin, että Suomessa pystytään tuottamaan maakaasulla tarvittavaa määrää energiaa, aina kun uusiutuvilla ei energiaa tarpeeksi saada. Yhteensä Suomessa tuotettaisiin sähköenergiaa vuoden 2018 kysynnän verran eli 87,5 TWh. Näin ollen saatiin maakaasulla tuotettavan sähkön määräksi 2,45 TWh.

Tämän lisäksi työssä laskettiin Suomen hiilidioksidipäästöt ydinvoiman ja uusiutuvien maksimaalisella yhdistämisellä. Hiilidioksidipäästöt laskettiin kaavalla 1, ja taulukossa 4 esitettyjen energiamäärien lisäämistarpeen ja taulukossa 2 esitettyjen hiilidioksidi päästökerrointen avulla. Laskennan tulokset on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Uusiutuvien ja ydinvoiman maksimaalinen käyttö

Energia- lähde	Energian tuotanto (TWh)	Lisäys- tarve (TWh)	Ominai- sinves- tointi (mrd. €)	Pääoma- kustannus (milj.€)	Käyttö- kustan- nus (milj.€)	CO ₂ - päästöt (miljoo- naa ton- nia)
Ydinvoima	36,1	13,2	5,95	346,8	580,85	0,433
Tuulivoima	13	7,2	3,42	242,9	100,1	0,143
Vesivoima	15,7	2,6	3,12	181,83	188,4	0,377
Biosähkö	15,7	4,3	1,11	78,8	908,97	3,611
Aurinko- voima	4,55	3,65	4,01	309,2	67,57	0,187
Maakaasu	2,45	-	-	-	147,37	0,488
Yhteensä	87,5	30,95	17,61	1 159,5	1 993,16	5,24

Ydinvoiman ja uusiutuvien maksimaalinen yhdistäminen vaatii pääomainvestointeja 1,16 miljardin euron verran vuodessa, ja käyttökustannuksia syntyy vuodessa 1,99 miljardia euroa. Suomen oma sähköntuotantomäärä nousisi kuitenkin 20 TWh, ja näin ollen tuontisähköä tarvittaisiin kokonaisuudessaan nykyistä vähemmän, vaikkakin todellisuudessa sähkön vaihtelevan tuotantomäärän takia siitä ei kokonaan päästäisikään eroon. Maakaasua voitaisiin valmistaa nykyisissä voimaloissa, joten maakaasu ei tarvitse uusia investointeja. Jos Olkiluoto 3:n rakennusprojektin kustannukset nousevat kaksinkertaisiksi, pääomainvestoinnin kokonaisarvoksi muodostuu 1,506 miljardia euroa vuositasolla. Ominaisinvestointeja kyseinen malli tarvitsisi kokonaisuudessaan 17,61 miljardia euroa, olettaen että Olkiluoto 3:n kustannukset pysyvät odotetun kokoisina.

Vuoden 2018 sähköntuotannossa otettiin huomioon vain taulukossa 3 esiintyvät eli yleisimmät energiantuotantomenetelmät. Näin ollen esimerkiksi öljyllä tuotettu sähkömäärä ja sen kustannukset jäivät laskuista pois. Kokonaisenergiantuotanto yleisemmillä energianlähteillä oli kuitenkin 65,77 TWh, eli yli 97 % kokonaissähköntuotannosta Suomessa.

Tämän hetken toimivat voimalaitokset Suomessa eivät tarvitse enää uusia alkuinvestointeja, joten ne voitiin jättää kokonaan pois laskuista. Näin ollen käyttökustannukset ovat ainoita kulueriä jo olemassa oleville laitoksille. Käyttökustannukset laskettiin kaavan 3 ja kuvan 1 energiantuotantomäärien avulla. Energiantuotantomäärät, joita laskuissa

käytettiin, on esitetty uudestaan taulukossa 7. Tämän lisäksi laskettiin myös CO₂-päästöt nykyiselle sähköntuotannolle. Tulokset näille laskuille esitetään taulukossa 7.

Taulukko 7. Suomen tämänhetkisen energiantuotannon määrät energialähteittäin (TWh), energiantuotannosta aiheutuvat käyttökustannukset ja hiilidioksidipäästöt.

Energianlähde	Energiantuotanto (TWh)	Käyttökustannus (miljoonaa €)	CO ₂ -päästöt (miljoonaa tonnia)
Ydinvoima	21,6	347,54	0,259
Tuulivoima	5,8	44,66	0,064
Vesivoima	13,1	157,2	0,314
Biosähkö	11,4	659,95	2,622
Aurinkovoima	0,9	13,37	0,037
Maakaasu	3,48	209,32	0,693
Kivihiili	6,09	316,619	2,041
Turve	3,4	198,19	0,366
Yhteensä	65,77	1 946,84	6,396

Käyttökustannuksia Suomen nykyiselle sähköntuotannolle syntyy 1,95 miljardia euroa vuodessa. Käyttökustannukset ovat 46 miljoonaa euroa pienemmät, kuin maksimaalisen uusiutuvien ja ydinvoiman käytön skenaariossa, mutta sähköä tuotetaan nykytilanteessa vähemmän. Nykytilanteessa käyttökustannuksien hinnaksi per tuotettu terawattitunti saadaan 29,6 miljoonaa euroa, kun taas maksimaalisten uusiutuvien ja ydinvoiman tilanteessa 22,8 miljoonaa euroa. Pääomakustannuksia maksimaalinen ydinvoiman ja uusiutuvien lisääminen aiheuttaisi 13,3 miljoonaa euroa terawattituntia kohden, mikäli Olkiluoto 3:n pääomakustannukset olisivat taulukon 3 arvojen mukaisia, ja 17,2 miljoonaa euroa, jos uuden ydinvoimalan rakennuskustannukset tuplaantuvat odotetusta.

Suomen kokonaishiilidioksidi päästöt putoaisivat vuoden 2018 määrästä 1,15 miljardia kiloa. Sähkön kokonaissähköntuotantomäärään suhtautettuna maksimi ydin- ja uusiutuvansähköntuotannon skenaariossa päästöjä syntyisi 59,9 miljoonaa kiloa terawattituntia kohden, kun taas nykytilanteessa CO₂-päästöjä syntyy 97,3 miljoonaa kiloa per terawattitunti.

6. Johtopäätökset

Työssä käsiteltiin kahta eri skenaariota Suomen ydinvoiman korvaamiselle. Ensimmäisessä tavassa ydinvoima korvataan kokonaan uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla, ja toisessa tuuli- sekä maakaasusähköllä. Uusituilla energianlähteillä ydinvoiman korvaaminen aiheuttaisi vuosittain 1,003 miljardin euron pääomakustannuskustannuksien lisäyksen ja 77,7 miljoonan euron käyttökustannuksien lisääntymisen. Hiilidioksidipäästöjä kyseinen korvaamistapa lisäisi 1,09 miljardia kilogrammaa vuodessa. Ydinvoiman korvaaminen tuuli- ja maakaasusähköllä puolestaan aiheuttaisi pääomakustannuksia 445,4 miljoonaa euroa ja käyttökustannuksia 425,5 miljoonaa euroa vuodessa. Taloudellisesti tämän menetelmän kulut olisivat 19,4 % pienemmät vuodessa kuin mitä uusiutuvilla korvattaessa, mutta CO₂-päästöt olisivat 2,16 kilogrammaa suuremmat kuin nykytilanteessa. Ominaisinvestointien saralla tuuli- ja maakaasusähköllä korvaaminen olisi yli puolet edullisempaa, kuin uusiutuvilla korvaaminen. Toisaalta uusiutuvien lisääntymisen nostaisi Suomen omavaraisuutta sähköntuotannossa voimakkaasti, toisin kuin ulkomailta tuotu maakaasu.

Suomi on kuitenkin sitoutunut jatkamaan ydinvoiman käyttöä yhä tulevaisuudessa. Olkiluoto 3:n valmistuminen vahvistaa tätä päätöstä edelleen, ja tekee ydinvoimasta luopumisesta yhä kalliimpaa ja vaikeampaa. Suomi on panostanut ydinvoimasta syntyvän jätteen varastointiin turvallisesti, ja Suomeen avataankin 2020-luvulla maailman ensimmäinen ydinjätteenvarastointipaikka Olkiluotoon. Yhteensä ydinvoiman sähköntuotanto nousee Olkiluoto 3:n valmistumisen jälkeen vastaamaan 40,3 % Suomen sähköntuotannosta.

Todellinen ydinjätteistä luopumisskenaario etenisi todennäköisesti hyvin samalla lailla, kuin Saksan tapauksessa on käynyt, kun maa päätti vuonna 2011 luopua ydinvoimasta vuoteen 2022 mennessä. Saksassa kivihiilen ja ruskohiilen käyttö nousi päätöstä seuraavina vuosina voimakkaasti, vaikka maa pyrkikin täyttämään ydinenergian jättämää aukkoa sähköntuotannossa mahdollisimman paljon uusiutuvilla energiamuodoilla. Vaikka Suomikin lähtisi tavoittelemaan ydinvoiman korvaamista uusiutuvilla sähköntuotantomenetelmillä, maassamme jouduttaisiin varmasti alkuun lisäämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä, sillä uusiutuvien tarvitsema infrastruktuuri ei ehtisi valmistua tarpeeksi nopeasti. Fossiilisista energiamuodoista myös kivihiilen osuutta olisi alkuun lisättävä, sillä nykyinen maakaasun siirtopotentiali ei riittäisi kattamaan kaikkea tarvittavaa sähköntuotantomäärää. Lisäksi Suomi olisi yhä enemmän riippuvainen ulkomaisesta

sähkön tuonnista, ainakin niin kauan, että tarvittava sähköinfrastruktuuri saataisiin valmiiksi.

Työssä käytiin läpi myös mahdollisuutta kasvattaa Suomen ydinvoiman määrää ja uusiutuvien määrää maksimiin. Tällöin Suomessa tuotettaisiin yhteensä 85 TWh vähä hiilidioksidipäästöistä sähköä vuosittain. Uusiutuvien maksimaalista määrää rajoittaa uusiutuvien vaihteleva saatavuus ja sähkön varastointipotentiaalin vähyys Suomessa, joten Suomen kokonaisenergian käytöstä 2,5 TWh pitäisi vielä tuottaa maakaasulla, jotta Suomen sähkön tuotanto olisi samansuuruinen kulutuksen kanssa. Pääomakustannuksia maksimaaliselle ydinvoiman ja uusiutuvien käytölle tulisi 1,16 miljardia euroa ja käyttökustannuksia 1,99 miljardia euroa vuodessa. Tässä vaiheessa Olkiluoto 3:n lopullista budjettia ei kuitenkaan vielä tiedetä, ja jos ydinvoimalan rakennushankkeen kustannukset paisuvat kaksinkertaisiksi, pääomakustannusten kokonaisarvo nousee 1,51 miljardiin euroon vuotta kohden. Jos Olkiluoto 3:n budjetti pysyy arvioidussa, maksimaalisen ydin- ja uusiutuvan energian skenaarion pääomakustannuksiksi tulee 13,3 miljoonaa euroa tuotettua terawattituntia kohden, ja käyttökustannuksiksi 22,8 miljoonaa euroa per terawattitunti. Nykyisen Suomen energiajärjestelmän käyttökustannukset ovat 29,6 miljoonaa euroa per terawatti, ja työssä ei ole huomioitu nykyisen energiajärjestelmän pääomakustannuksia. CO₂-päästöjä maksimaalinen uusiutuvien- ja ydinenergiankäyttömalli tuottaisi 59,9 miljoonaa kilogrammaa tuotettua terawattituntia kohden, kun nykyinen sähköjärjestelmä tuottaa 97,3 miljoonaa kiloa, eli maksimaalinen uusiutuvien ja ydinvoiman käyttö pienentäisi hiilidioksidipäästöjä 39 %.

LÄHTEET

- [1] World Nuclear Association, Outline history of nuclear energy, Helmikuu 2020, Saantitapa: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx> Viitattu: 07.04.2020.
- [2] International Energy Agency, Electricity information overview, Toukokuu 2019, Saantitapa: https://iea.blob.core.windows.net/assets/722cdfb8-a938-43d6-ad99-1fbf3e53bf8e/Electricity_Information_2019_Overview.pdf Viitattu: 05.04.2020.
- [3] Pöyry Management Consulting Oy, EU:n 2030 ilmasto- ja energiapolitiikan linjausten toteutusvaihtoehdot ja Suomen omien energia- ja ilmastotavoitteiden toteutuminen, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta, 30.05.2016, Saantitapa: <https://tietokayttoon.fi/julkaisu?pubid=12101>
- [4] U. Nestle, Does the use of nuclear power lead to lower electricity prices? An analysis of the debate in Germany with an international perspective, Energy Policy, Vol. 41, pp. 152-160, 2012.
- [5] T. Bruckner, I.A. Bashmakov, Y. Mulugetta, H. Chum, A. de la Vega Navarro, J. Edmonds, A. Faaij, B. Fungtammasan, A. Garg, E. Hertwich, D. Honnery, D. Infield, M. Kainuma, S. Khennas, S. Kim, H.B. Nimir, K. Riahi, N. Strachan, R. Wisner, and X. Zhang, 2014: Energy Systems. In: Climate Change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Saatavana verkossa: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter7.pdf Viitattu: 20.03.2020.
- [6] Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto. 2018. Helsinki: Tilastokeskus, Saantitapa: https://www.stat.fi/til/salatuo/2018/salatuo_2018_2019-11-01_tie_001_fi.html Viitattu 15.3.2020.

- [7] Energiateollisuus, Energiavuosi 2018-Sähkö, 12.04.2019, Saantitapa: https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/energiavuosi_2018_-_sahko.html Viitattu 30.03.2020.
- [8] Suomen virallinen tilasto (SVT), Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2018, Tilastokeskus, Viitattu 18.3.2020, Saantitapa: https://www.stat.fi/til/khki/2018/khki_2018_2019-05-23_kat_001_fi.html
- [9] Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto, Tilastokeskus, Saantitapa: https://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2008/salatuo_2008_2009-10-21_tie_001_fi.html Viitattu: 16.3.2020.
- [10] Fortum, Voimalaitoksen toiminta, Fortum, 2020. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/yhtiomme/energiantuotantomme/voimalaitoksemme/loviisan-voimalaitos/voimalaitoksen-toiminta>, viitattu 24.2.2020.
- [11] TVO, OL1 ja OL2, TVO, 2020, Saantitapa: <https://www.tvoy.fi/tuotanto/laitosyksikot/ol1jaol2.html> Viitattu: 24.2.2020.
- [12] Säteilyturvakeskus, Ydinvoimalaitostyyppit, 8.7.2015, Saantitapa: <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinvoimalaitokset/miten-ydinvoimalaitos-toimii/ydinvoimalaitostyyppit> Viitattu 24.2.2020.
- [13] E. Vankkilainen, A. Kivistö, Sähköntuotantokustannusvertailu, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2017, Saantitapa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/143861/S_%c3%a4hk_%c3%b6n_%20tuotantokustannusvertailu_ok.pdf?sequence=2&isAllowed=y Viitattu: 09.04.2020.
- [14] Posiva Oy. Mitä ydinjäte on?, 2020, http://www.posiva.fi/loppusijoitus/ydinjatehuolto/mita_ydinjate_on#.XnNdM6gzY2y Viitattu 17.3.2020.
- [15] E. Pain, Reports raise concerns about France's nuclear waste tomb, Science, Vol. 357 (6354), pp. 858, 2017.
- [16] J. Hyvärinen, Säädeltävä ydinvoima vakauttaa sähköhuoltoa, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 17.12.2014, Saantitapa: https://www.lut.fi/uutiset/-/aset_publisher/h33vOeufOQWn/content/saadettava-ydinvoima-vakauttaa-sahko-huoltoa

- [17] S. Schlömer , T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wiser, 2014, Technology-specific cost and performance parameters, Saantitapa: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf#page=7
- [18] Fortum, Ydinvoiman käytetyn polttoaineen loppusijoitus hoidetaan Suomessa kunnolla, 2020, Saantitapa: <https://www.fortum.fi/media/2016/11/ydinvoiman-kaytetyn-polttoaineen-loppusijoitus-hoidetaan-suomessa-huolella> Viitattu: 18.03.2020.
- [19] D. Farag, L. Groen, Recent developments and future trends in Germany's electricity market, Spring 2016, Norges handelshøyskole, Saantitapa: https://openaccess.nhh.no/nhh-xmlui/bitstream/handle/11250/2403430/Farag_Groen.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [20] Fraunhofer Institute For Solar Energy Systems, Net public electricity generation in Germany, Saantitapa: https://www.energy-charts.de/en-ergy_pie.htm?year=2011 Viitattu: 29.3.2020.
- [21] B. Knopf, M. Pahle, H. Kondziella, F. Joas, O. Edenhofer ,T. Bruckner, Germany's nuclear phase-out: Sensitivities and impacts on electricity prices and CO2 emissions, Economics of Energy & Environmental policy, Vol. 3, pp. 89-106, 2014
- [22] Eurostat, Electricity price statistics, Eurostat, 14.02.2020, Saantitapa: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics Viitattu: 20.03.2020.
- [23] Eurostat, Electricity and natural gas price statistics, 21.11.2011, Saantitapa: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/38154/41386/SEarticle2011S1.pdf/505395ff-d855-47f2-98f0-99d899968b25>
- [24] Suomen virallinen tilasto (SVT): Polttoaineluokitus 2020, 2020, Saantitapa: http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html Viitattu: 25.3.2020.
- [25] IRENA, Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030, Lokakuu 2017, Saantitapa: <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>

- [26] Pyhäjärven Callio, Pyhäjärven Callio maanalainen menestystekijä, 2020, Saantitapa: <https://callio.info/> Viitattu: 26.4.2020.
- [27] B. Zakeri, S. Syri, S. Rinne, Higher renewable energy integration into the existing energy system of Finland – Is there any maximum limit?, Energy, Vol. 92(3), pp. 244-259, 2015.
- [28] IRENA, Hydropower, Renewable energy technologies: Cost analysis series, Vol. 1, Power sector issue 3/5, Kesäkuu 2012, Saantitapa: https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-hydropower.pdf